

В.А. Погодаев

ПРОЗРАЧНОСТЬ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО CO₂-ЛАЗЕРА: УСЛОВИЯ СТАБИЛЬНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ

Представлены результаты анализа данных натуральных исследований по энергетическому ослаблению мощного лазерного излучения в реальной атмосфере. Выявлены условия, определяющие устойчивость коэффициента пропускания атмосферой такого излучения в различных оптико-метеорологических ситуациях.

Повышение эффективности работы лазерных систем в реальной атмосфере связано с увеличением энергетических параметров излучения. Превышение некоторого порогового значения этих параметров инициирует развитие нелинейно-оптических явлений на трассе распространения, искажающих заданные параметры пучка излучения. Характер и масштабы искажений, а также физические механизмы и динамика их формирования зависят от интенсивности излучения, микроструктуры аэрозоля, скорости ветра, турбулентности и т.д. [1]. В связи с этим создание оптических систем, использующих мощное лазерное излучение (МЛИ), требует предварительной оценки эффективности их работы в реальной атмосфере при различных метеоусловиях.

Влияние влажных дымок и жидкокапельной фракции аэрозоля (туман, морось, дождь) на коэффициент пропускания импульсного излучения CO₂ лазера T_e подробно рассмотрено в [2–4]. В совокупности учтены два основных процесса взаимодействия МЛИ с аэрозолем: испарение жидкой фазы аэрозолей, приводящее к просветлению объема взаимодействия; пороговое возникновение на испаряющихся обводненных частицах очагов пробоя (ОП), увеличивающих ослабление МЛИ. Обводнение твердофазного аэрозоля слабо влияет на условия возникновения пробоя в сильных оптических полях [3]. В значительно большей степени влияет концентрация грубодисперсной фракции твердофазного аэрозоля $N_{гд}$ [4]. Известно [5], что жидкокапельные метеообразования являются естественным фильтром, очищающим атмосферу от твердофазного аэрозоля. Вымывание грубодисперсной фракции происходит за различные времена, определяемые оптико-метеорологическим состоянием (ОМС) атмосферы и дисперсным составом жидкокапельных образований.

В данном сообщении приводятся результаты анализа массива экспериментальных данных по распространению излучения импульсного CO₂-лазера микросекундной длительности в различного типа аэрозольных образованиях (туман, морось, дождь, снег) в атмосфере. Рассматривается влияние продолжительности воздействия этих образований на ослабляющие свойства атмосферы для МЛИ. Актуальность такого анализа обусловлена необходимостью установления критерия однозначности прогноза T_e в различных ОМС атмосферы.

Комплексные измерения по распространению МЛИ в указанных ОМС включали: определение коэффициента пропускания трассы, фотоконтроль наличия ОП, измерение дисперсного состава фонового аэрозоля, контроль стандартных метеопараметров. Боковой ветер отсутствовал. Сохранялась неизменной геометрия пучка МЛИ: $F/R = 9 \cdot 10^2$ (F – фокусное расстояние передающего зеркального телескопа, формирующего пучок излучения с начальным радиусом R).

При рассмотрении оптической ситуации на трассе важно знать время существования конкретного ОМС атмосферы. В проведенных сериях измерений не удалось охватить ОМС непосредственно с момента образования до его распада. Иллюстрация влияния тумана на $N_{гд}$ в одной из экспериментальных серий приведена на рис. 1.

Последовательность реализации на трассе типов оптической погоды следующая: трехчасовая туманная дымка, туман (время существования 1 ч 10 мин), туманная дымка. Изменения $N_{гд}$ существенны. Последствия такого изменения показаны на рис. 2.

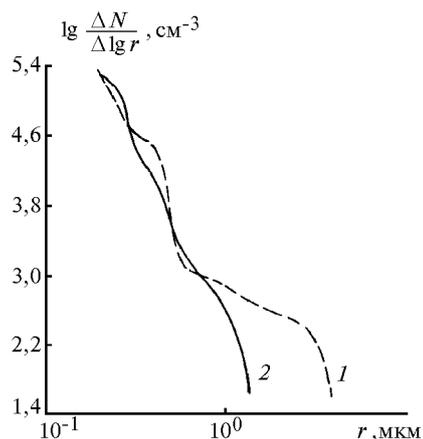


Рис. 1. Влияние тумана на функцию распределения частиц по размерам: 1 – дисперсный состав аэрозольных частиц за 15 мин до образования тумана; 2 – дисперсный состав через 15 мин после распада тумана

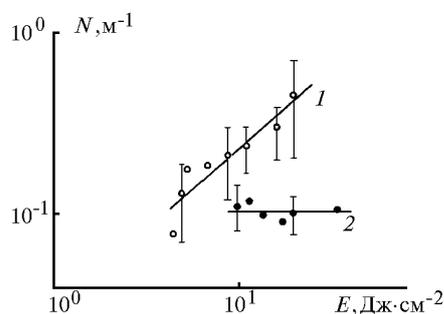


Рис. 2. Зависимость линейной концентрации очагов оптического пробоя атмосферы от плотности энергии лазерного излучения. Время существования тумана на трассе измерений 15 мин (1), 30 мин и более (2)

Четверть часа существования тумана уменьшает концентрацию ОП, возникающих при прохождении импульса МЛИ, в 10 раз по сравнению со случаем оптической погоды типа дымки весны и осени [6] ($E = 10 \text{ Дж/см}^2$). Получасовое и более существование тумана на трассе стабилизирует количество ОП (следовательно, и $N_{\text{гд}}$) в диапазоне энергий МЛИ, реализованных в эксперименте. На рис. 2 нанесены точки из многолетнего массива данных. Отсутствие разброса значений $N(E)$ для некоторых точек не означает единичных измерений. В этом случае имеет место от трех до пяти совпадений.

Рис. 3 иллюстрирует влияние микроструктуры аэрозольных метеообразований на величину нелинейного коэффициента ослабления (α_n) импульсного излучения CO_2 -лазера. Плотность энергии излучения в фокальной плоскости формирующего пучок телескопа ($E_{\text{ф}}$) не превышала 20 Дж/см^2 . Коэффициент ослабления излучения при отсутствии нелинейности среды распространения (α_0) определялся из оптико-метеорологического состояния атмосферы [7]. Зависимости получены методом наименьших квадратов. Скобками показан разброс экспериментальных данных.

Для тумана в диапазоне реализованных в экспериментах значений α_0 отношение $A = \alpha_n/\alpha_0$ изменяется незначительно. Увеличение A не превышает $5 \cdot 10^{-3}$ при увеличении энерговклада в среду на 1 Дж/см^2 .

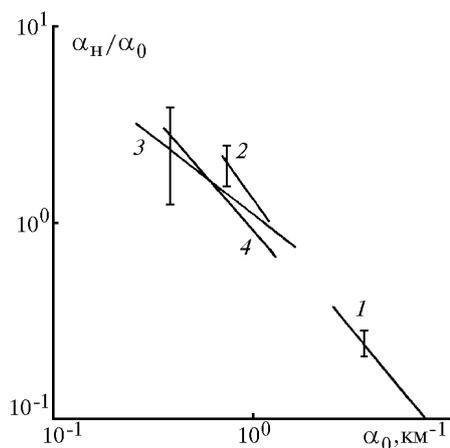


Рис. 3. Влияние на величину нелинейного коэффициента ослабления излучения CO_2 -лазера оптико-метеорологического состояния атмосферы: туман (1), морось (2), дождь (3), снег (4)

Увеличение размеров частиц жидкокапельного метеообразования (морось) и, следовательно, уменьшение их концентрации значительно поднимают величину A , выводя ее на уровень ~ 2 для той же геометрии пучка и энергии излучения, что и для тумана. Измерения спектра размеров фонового аэрозоля на трассе спустя 0,5 ч после начала мороси указывают на меньшую чувствительность грубодисперсной фракции к этому виду ОМС атмосферы по сравнению с туманом. Непрерывное время измерений в экспериментальных сериях, реализованных в условиях мороси, не превышало 40 мин. Линейная концентрация ОП в канале пучка МЛИ при этом уменьшалась в 3–4 раза относительно оптико-метеорологической ситуации предшествующей мороси, практически повторяя ход кривой I на рис. 2. Соответственно увеличение энерговклада в среду на 1 Дж/см^2 приводит к возрастанию A на величину $7 \cdot 10^{-2}$.

Влияние энерговклада в среду на нелинейный коэффициент ослабления излучения CO_2 -лазера в дожде

A	1,95	2,45	2,95
$E_{\text{ф}}, \text{ Дж/см}^2$	12,7	21,1	23

Осадки – наиболее изменчивое во времени и пространстве ОМС атмосферы. Точки наблюдения, разнесенные на 1 км, могут давать интенсивность выпадения дождя, отличающуюся в 8–10 раз [5]. Реализованный в экспериментах диапазон изменения α_0 в присутствии дождей значительно расширяется в сторону малых α_0 . Анализ данных экспериментальной серии измерений в непрерывном дожде интенсивностью $I_{\text{д}} = 1,5\text{--}3,0 \text{ мм/ч}$ показывает, что для достижения усредненного значения $A \approx 1$ необходимо около 5 ч. Для слабого дождя ($I_{\text{д}} \leq 1 \text{ мм/ч}$) $A \approx 1$ уже по истечении ~ 6 ч. И наоборот, при $I_{\text{д}} \sim 15 \text{ мм/ч}$ достаточно ~ 1 ч. Увеличение энерговклада в среду ведет к значительному росту ослабления. Таблица иллюстрирует эту зависимость для шестиминутного отрезка времени при $I_{\text{д}} \sim 2,5 \text{ мм/ч}$. Время с начала выпадения дождя составляет ~ 2 ч.

Вид зависимости $A(\alpha_0)$ и ее численные значения для снегопада и дождя практически не отличаются. В то же время длительное существование жидкокапельных метеообразований дает ощутимый эффект очищения атмосферы от фонового аэрозоля и соответствующее повышение $T_{\text{с}}$, с одновременной стабилизацией $T_{\text{с}}$ от пуска к пуску МЛИ, а в снегопаде $A(t)$ возрастает во всем реализованном диапазоне энергии МЛИ. Нам неизвестны зависимости коэффициента ослабления снегопада от его интенсивности, подкрепленные типом снегопада и распределением в нем снежинок по размерам. Известно, что величина изменения ослабления может достигать $0,92 \text{ км}^{-1}$ при изменении интенсивности снегопада на 1 мм/ч [8]. Ослабление излучения ($\lambda = 10,6 \text{ мкм}$), не вызывающего нелинейных эффектов, в снегопаде при $I_{\text{с}} = 1 \text{ мм/ч}$ приблизительно втрое больше, чем в дожде при $I_{\text{д}} = 5 \text{ мм/ч}$ [9]. Это объясняется тем, что из-за меньшей скорости падения снега водность такого аэрозольного образования в 3–4 раза больше, чем в дожде той же интенсивности.

Для МЛИ при одинаковых оптических толщах жидкокапельных и кристаллических аэрозольных образований меньшее ослабление наблюдается для кристаллического аэрозоля [10]. Именно этим объясняется снижение величины A при увеличении энерговклада и $\alpha_0 = \text{const}$. При этом обеспечивается прохождение большей части импульса излучения не в кристаллическом, а в мелкокапельном аэрозоле [11] и перешедшей в пар $> 50\%$ массы кристаллов. Колебания величины $T_{\text{с}}$ при этом, наряду с $N_{\text{гд}}$, определяются микроструктурой снегопада и его интенсивностью.

Рассмотрим влияние ОМС атмосферы на устойчивость $T_{\text{с}}$ от пуска к пуску МЛИ. Рассмотрим будем вести по мере увеличения размера частиц аэрозольных метеообразований.

Туман. Распространенной характеристикой интенсивности тумана является метеорологическая дальность видимости $S_{\text{м}}$ [5]. Полная повторяемость значений $T_{\text{с}}$ в тумане для различных пусков МЛИ наблюдается при следующих условиях: время существования ОМС $t \geq 0,5 \text{ ч}$; $E = \text{const}$; $S_{\text{м}} = \text{const}$; пуски разнесены во времени не более чем на 5 мин. Для серий измерений, выполненных в различные годы, либо для пусков МЛИ в одной серии, разнесенных на значительное время при фиксированных значениях E и $S_{\text{м}}$, совпадающие значения $T_{\text{с}}$ наблюдаются при соблюдении дополнительного условия – равенства температур воздуха ($t_{\text{в}}$) во время выполнения пусков МЛИ. Колебания температуры воздуха в пределах $2 \text{ }^\circ\text{C}$ вызывают различия в значениях $T_{\text{с}}$ до $\pm 5\%$.

Морось. Имеющийся массив экспериментальных данных не позволил определить условия повторяемости T_e при $E = \text{const}$. Устойчивость T_e в пределах $\pm 5\%$ наблюдается при выполнении следующих условий: время существования ОМС ~ 1 ч; $E = \text{const}$; $S_M = \text{const}$; диапазон изменения значений относительной влажности воздуха $\leq 3\%$, температуры воздуха $\leq 2^\circ\text{C}$.

Дождь. Необходимыми условиями 5% устойчивости T_e в дождях с $I_d \leq 3$ мм/ч являются: $E = \text{const}$; $S_M = \text{const}$; $I_d = \text{const}$; время вымывания фонового аэрозоля (время существования ОМС) ~ 5 ч. Возрастание I_d уменьшает время вымывания фонового аэрозоля, но при этом ослабление МЛИ непосредственно частицами дождя может изменяться в широких пределах за короткие промежутки времени и разброс T_e значительно превышает 5%. Наиболее благоприятные условия пропускания МЛИ на приземных трассах реализуются сразу после прекращения затяжных дождей (продолжительность осадков около суток). В этом случае при $E = \text{const}$ наблюдается абсолютная устойчивость коэффициента пропускания атмосферы. Длительность существования подобной ситуации зависит от ветрового режима. При скорости ветра $V = 1\text{--}2$ м/с состояние повышенной прозрачности сохраняется в среднем около 0,5 ч. При $V = 5\text{--}6$ м/с достаточно 15–20 мин для появления ОП и развития соответствующего нелинейного ослабления.

Снег. Определение устойчивости T_e в снегопадах невозможно идентификацией E и S_M . Необходимо оперативное измерение микроструктуры снегопада, знание зависимости $\alpha_0(I_c)$ и однородности снегопада по I_c . По данным [12], зоны снегопада однородны по интенсивности на расстояниях $\sim 4\text{--}8$ км.

Таким образом, анализ экспериментальных данных по энергетическому ослаблению МЛИ в реальной атмосфере позволил выявить условия, определяющие относительную устойчивость коэффициента пропускания атмосферой МЛИ для различных типов оптической погоды при сохранении исходных параметров излучения. Основной причиной неоднозначности коэффициента пропускания атмосферы в жидкокапельных аэрозольных образованиях является наличие грубодисперсной фракции твердофазного аэрозоля.

Актуальность проблемы прогнозирования T_e и его устойчивости значительно возрастает с появлением мобильных автономных источников МЛИ разнообразного применения и с необходимостью их работы во всепогодных условиях [13].

1. Зуев В. Е., Землянов А. А., Копытин Ю. Д. // Нелинейная оптика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 256 с.
2. Гейнц Ю. Э., Землянов А. А., Кабанов А. М., Погодаев В. А. // Нелинейная оптика и оптоакустика атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 66–76.
3. Землянов А. А., Мальцева Г. А., Погодаев В. А. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 6. С. 609–614.
4. Гейнц Ю. Э., Землянов А. А., Погодаев В. А. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 9. С. 948–953.
5. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 639 с.
6. Ахтырченко Ю. В., Беляев Е. Б., Высоцкий Ю. П. и др. // Изв. вузов. Физика. 1983. № 2. С. 5–13.
7. Погодаев В. А. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 4. С. 339–344.
8. Труханова Л. П., Пожидаев В. Н. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 10. С. 1922–1929.
9. Бисярин В. П., Соколов А. В., Сухонин Е. В. и др. Ослабление лазерного излучения в гидрометеорах. М.: Наука, 1977. 176 с.
10. Волковицкий О. А., Добровольский А. Ф., Иванов Е. В., Коломеев М. П. // Труды ИЭМ. 1974. Вып. 5(43). С. 83–91.
11. Бельц В. А., Волковицкий О. А., Добровольский А. Ф. и др. // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 5. С. 1027–1033.
12. Бабкин Ю. С., Исхаков И. С., Соколов А. В. и др. // Радиотехника и электроника. 1970. Т. 15. № 12. С. 2459–2462.
13. Баранов И. Я. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 6. С. 581–584.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
14 мая 1997 г.

V. A. Pogodaev. Transparency of Ground Atmosphere for Pulsed CO₂-laser Radiation: Conditions of Transmittance Stability.

The analytical results of field investigation of high-power laser radiation attenuated by the realistic atmosphere are presented. The conditions are revealed determining the atmospheric transmittance stability in various optical – meteorological situations.